

颗粒组成对粉土动强度的影响分析^①

李治朋, 张宇亭, 马希磊, 安彦勇, 张腾飞

(交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

摘要:以天津汉沽地区某挡土墙地基粉土为研究对象,首先对不同颗粒组成的粉土做固结不排水动三轴剪切试验,采用各向等压固结,周围压力等于 100 kPa。固结完成后在不排水条件下施加轴向激振力,试验波形为正弦波,振动频率 1.0 Hz,试验中以试样在周期剪切时轴向周期应变达到 5% 作为破坏标准,得出粉土的动强度受颗粒组成的影响。细颗粒含量越大,其动强度越小,黏粒含量为 7.2% 的粉土循环剪应力比 CSR 约为 20.3% 黏粒含量粉土的 2 倍。粉土的动强度可以用循环剪应力比和破坏振次建立的幂函数关系式较好地拟合。在剪切过程中,粉土的孔隙水压力一直没有达到所施加的围压数值,最终稳定在 75%~85% 围压之间。同时,试验还得出孔隙水压力的增长模式不能用统一的 Seed 模型拟合,孔压增长规律的影响因素较多。

关键词:粉土; 动三轴; 固结; 动强度; 循环剪应力比; 破坏振次; 孔隙水压力

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)02-0500-05

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0500

Influence of Particle Composition on the Dynamic Strength of Silt

LI Zhi-peng, ZHANG Yu-ting, MA Xi-lei, AN Yan-yong, ZHANG Teng-fei

(Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

Abstract: The silt under a retaining wall foundation in the Hangu area of Tianjin was studied in this paper. Specifically, a consolidated undrained dynamic triaxial shear test on the silt of different particles is described, and the conclusion is that the dynamic strength of silt was impacted by the particles. The test used isotropic consolidation, and the ambient pressure is equal to 100 kPa. After consolidation, we applied an axial dynamic load in the undrained condition. The test waveform is a sine wave, and the vibration frequency is equal to 1.0 Hz. The sample used a periodic shear axial strain of 5% as the failure criterion. The test instrument is a DDS-70-type dynamic three-axle instrument. Silt samples were compacted in three layers in the cylindrical specimen. The sample water content is equal to 20%, and the dry density is 1.60 g/cm³. The diameter of the sample is 39.1 mm, and the height is 80 mm. We prepared soil samples with different clay contents. The soil's dynamic strength refers to, under the static stress conditions, the cycle load necessary to make the soil sample achieve certain failure criteria. We have drawn the following conclusions. Under the same test conditions, silt particles had a great influence on the dynamic strength. When the dynamic load is equal to 100 N, and the No.1 silt clay content is 20.3%, the vibration frequency reached 42, far less than that for the No.2 and No.3 silty soils. The clay contents of silts Nos.2 and 3 are 13.2% and 7.2%, respectively. With the increase in dynamic load, the No.3 silt vibration frequency is 2.2 times that of No. 1. A higher clay content means that the proportion of fine particles

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(TKS110207)

作者简介: 李治朋(1984—), 男(汉族), 工程师, 主要从事岩土工程测试与研究. E-mail: lzplz@126.com

is greater, the coarse particle content is lower, and the plasticity is greater. That is, it is closer to clay. Friction of fine particles was significantly less than that of coarse particles. Therefore, the coarse silt's dynamic strength is relatively large. Pore water pressure generated under a vibrating load is an important factor affecting the soil strength and deformation. Pore water pressure is the key to the analysis of dynamic strength by effective stress. From the test results, for the three kinds of silt in the shearing process, the pore water pressures grow but do not reach the value of 100 kPa of the applied confining pressure. The pore water pressure is stable between 75 and 85 kPa. The more fine the particles, the lower the dynamic strength contained by the silt. The cyclic shear stress ratio (CSR) of silt with 7.2% of viscosity particles was about two times that of silt with 20.3% of viscosity particles. The dynamic strength of silt could be fitted by the CSR and power function relation created by the failure time of the vibration. In the shearing process, the pore water pressure of silt did not reach the numerical result of the ambient pressure, and eventually stabilized at 75~85% of the ambient pressure. Additionally, from this trial it could also be concluded that the growth pattern of pore water pressure could not be fitted by the unified Seed model, and the growth of pore pressure was influenced by many factors.

Key words: silt; dynamic triaxial; consolidation; dynamic strength; cyclic shear stress ratio; failure vibration number; pore water pressure

0 引言

1962 年汪闻韶等^[1-2]提出了饱和砂土振动孔隙水压力的扩散及消散规律,之后将马斯洛夫的一维动力渗透理论扩展到三维问题。1966 年 Seed 和 Lee^[3]采用振动三轴试验,对饱和砂土层在地震波水平循环剪切作用下进行了模拟和研究,以孔压值作为判断砂土是否液化的依据,并提出了“初始液化”的概念。近几年来土体动力学研究成为了一门学科,土体的动应力与动应变关系研究日趋成熟。

周健等^[4]用 GDS 动三轴试验系统采用等幅循环应变加载方式对含有不同厚度粉土的饱和和层状砂土进行液化强度试验,分析均匀砂和含有不同粉粒层厚度的层状砂土在循环荷载作用下的变形和力学特性。试验分析表明:由于含粉粒夹层的层状土特殊的土体结构,其孔隙水压力发展规律与一般的无黏性砂土不同;饱和和层状砂土的抗液化强度并非随着粉粒层厚度的增加而单调增加,而是存在一个临界点;液化临界剪应变的大小与液化判别标准和循环次数有很大关系。随后,周健在文献^[5]中研究饱和和粉土在振动荷载作用下动孔压的变化特性,认为在采用 Seed 公式时,动剪应力不仅对拟合参数 θ 的影响较大,甚至会影响孔压发展模型,利用修正 Seed 公式在一定程度上解决了拟合参数 θ 受动剪应力的影响较大的问题,并且在一定的动荷水平下修正 Seed 公式中的拟合参数 θ 只与土性相关,而与动荷条件关系不大。文中修改了 Seed 公式,建议使

用一种增量型的孔压模型,它不仅解决了全量型孔压模型无法统一模拟不同动荷条件下粉土的动孔压发展模式的问题,而且解决了全量型孔压模型在拟合孔压时拟合度随着破坏振次的降低而变差的问题。

李飒^[6]根据动三轴试验的结果,对天津地区的混黏土的粉土、粉砂在循环荷载作用下的孔压累积及动变形特性进行分析研究,对混黏土粉土、粉砂室内试验液化判别的孔压及应变标准进行探讨,并将现场波速试验与室内试验判别液化的结果相比较,发现对于天津地区的混黏土粉土、粉砂,在循环荷载作用下孔压达到围压的 60%~80%,即趋于稳定,相应的全幅应变约为 5%。

闫澍旺等^[7]模拟防波堤地基土在波浪循环荷载作用下的实际应力路径,对天津港原状软黏土进行室内动、静三轴试验,由试验数据确定不同荷载组合下软黏土抗剪强度折减率的规律性曲线,进而确定波浪循环荷载作用下软黏土的强度弱化程度。结合软黏土强度折减规律及有限元方法,分析波浪循环荷载作用下半圆体防波堤地基稳定性以及地基加固方案的有效性。

曾长女^[8]对粉土施加动荷载使其发生液化后,在不排水条件下施加单调静荷载,直至土体达到强度稳定停止试验。试验结果表明,不同初始有效固结压力、初始孔隙比对液化后土体不排水剪切强度影响较大;液化后粉土表现出明显的剪胀特性,颗粒

结构重组,孔压在不排水条件下逐渐消散,土体强度则逐渐增加并最终趋于某一稳定值;剪切强度与初始有效固结压力呈线性关系;孔隙比越小,其液化后剪切强度越大。

前人对土体动力学的研究以砂土和粉土为主,研究较多的是饱和粉砂或粉土的液化强度,对于土体颗粒组成对动强度的影响研究则较少。本文主要对天津地区不同黏粒含量的粉土动强度做固结不排水动三轴剪切试验,研究不同颗粒组成对土体动强度和动孔压的影响。

1 试验说明

本文试验取土位置在天津汉沽 IT 产业园区内,海挡外移工程某段,土层分布为:表层 0~6 m 多为粉土,下部为粉质黏土,中间夹有粉土、粉砂以

及淤泥质黏土层。

粉土试样采用分 3 层击实成型,试样初始含水率控制在 20.0%,干密度为 1.60 g/cm³,试样直径 39.1 mm,高 80 mm。配制不同黏粒含量所用的土样均为本次试验所取的土样,试验所用土样的颗粒组成见表 1 及图 1。

试验仪器主要为 DDS-70 型动三轴仪,其技术参数见表 2。采用固结不排水动三轴剪试验,在周围压力 σ_3 和 σ_1 作用下固结,采用各向等压固结,即试样的固结应力比 $K_c=\sigma_1/\sigma_3=1.0$,周围压力 $\sigma_3=100$ kPa。固结完成后在不排水条件下施加轴向激振力,试验波形为正弦波,振动频率为 1.0 Hz。试验中以试样在周期剪切时轴向周期应变达到 5% 作为破坏标准。

表 1 试样的物理性质

Table 1 Physical properties of the sample

土样编号	含水率/%	干密度/(g·cm ⁻³)	液限/%	塑限/%	塑性指数/%	0.25~0.075/%	0.075~0.005/%	小于 0.005/%
1 号粉土	20.0	1.60	26.3	16.9	9.4	15.3	64.4	20.3
2 号粉土	20.0	1.60	23.5	15.8	7.7	24.3	62.5	13.2
3 号粉土	20.0	1.60	20.8	14.6	6.2	41.4	51.4	7.2

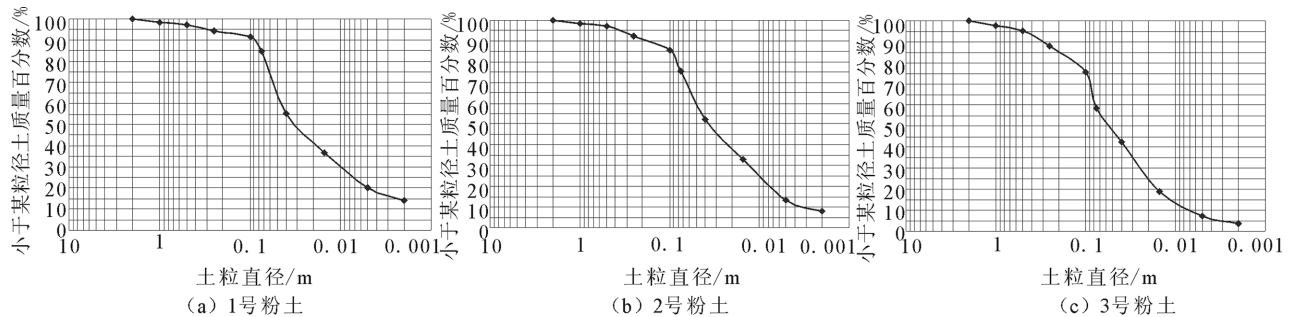


图 1 粉土颗粒分析曲线

Fig.1 Grain analysis curve of the silt

表 2 DDS-70 型动三轴仪技术参数

Table 2 Technical parameters of the dynamic triaxial instrument DDS-70

试样尺寸 /(mm×mm)	最大动 轴力/N	侧向压 力/MPa	反压 /MPa	频率 /Hz	最大轴向 位移/mm
φ39.1×H80	1 370	0~0.6	0~0.3	0.05~10	20

2 土体动强度的表示方法

土体动强度是指在某种静应力条件下,循环周期荷载使土样在一定加载周期内达到某种破坏标准所需要的剪应力。常规动三轴试验得到的土体动强度一般通过循环轴向动应力幅值的一半 $\sigma_d/2$ 和相应的破坏振次 N_f 之间建立关系来表示,即 $\sigma_d\text{-lg}N_f$

曲线;或者是建立循环剪应力比 CSR (Cyclic Stress Ratio)和相应破坏振次 N_f 的关系,即 $\sigma_d/2\sigma'_2\text{-lg}N_f$ 曲线。该曲线可用幂函数式的关系曲线拟合,即:

$$CSR = AN_f^{-B} \tag{1}$$

式中 A、B 为试验参数。

3 试验成果分析

3.1 动强度与破坏振次的关系

由表 3 和图 2 可以看出,试验条件一样的情况下粉土颗粒组成对动强度影响较大。施加的动荷载 $F_d=100$ N 时,1 号粉土黏粒含量为 20.3%,破坏振次为 42 次,远小于 2 号和 3 号粉土的黏粒含量,即 13.2%和 7.2%。随着动荷载的增大,3 号粉土的破

坏振次是 1 号粉土的 2.2 倍。动荷载相同的条件下,破坏振次越大,其动强度必然越大。

对于粉土,黏粒含量越大,意味着细颗粒所占比例越大,粗颗粒含量越少,可塑性越大,也越接近于黏性土,颗粒间的黏聚力会有少许的增加,但细颗粒间的摩擦力明显小于粗颗粒间的摩擦力。因此,粗颗粒粉土的动强度 CSR 较大。

同时,由试验结果可知,动强度与破坏振次的关系可以用幂函数式(1)较好地拟合。

表 3 试验采用的动荷载大小

破坏振次 N_f /次	动荷载 F_d /N		
	100	120	140
1 号粉土	42	28	12
2 号粉土	60	38	19
3 号粉土	68	46	26

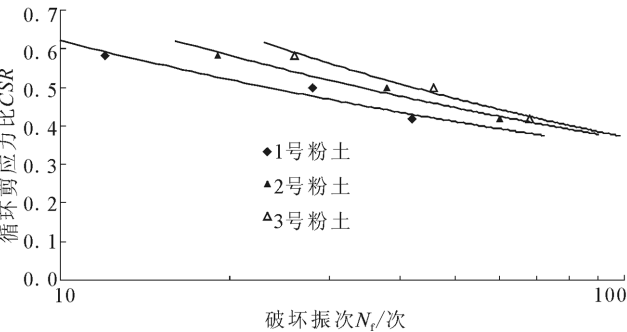


图 2 粉土动强度 CSR 与破坏振次 N_f 关系曲线
Fig.2 The relationship between CSR and N_f

3.2 孔压应力发展模式

土体在振动荷载作用下产生的孔隙水压力是影响土体强度和变形的因素,也是有效应力法动力反应分析的关键。目前对振动孔压特性的研究方法大部分是基于土体的动力试验,通过对试验结果的分析,建立振动孔压与某特定动力参数之间函数关系(主要通过数学拟合的方法),从而得到振动孔压的数学计算模型。孔压的应力模型、应变模型和能量模型是这类方法的代表,其中又以孔压的应力模型最为常见。孔压应力模型中的经典模型是 Seed 在等压固结不排水条件下提出的关系式,即

$$\frac{u}{\sigma'_0} = \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{N}{N_L}\right)^{1/2\theta} \tag{2}$$

式中: σ'_0 为有效围压(kPa); N 为振次(次); N_L 为破坏振次(次); θ 为与土性相关的试验参数。

后来各学者提出的孔压应力模型都是以式(2)为基础。

由图 3 可以看出,在剪切过程中三种粉土的孔

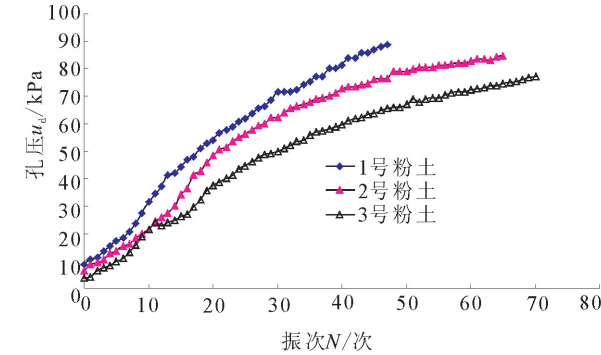


图 3 剪切过程中动孔压 u_d 与振次 N 关系曲线
Fig.3 The relationship between pore water pressure (u_d) and vibration number (N) in shear test

隙水压力都在不断增加,但始终没有达到所施加的围压数值 100 kPa,其稳定值在 75~85 kPa 之间,与周健所得结论(即在动荷载作用下最终孔隙水压力将增长到围压的数值)不太一致,而与李飒所得结论相符。孔隙水压力增长规律受到土性、动荷载条件(包括动荷载幅值、频率等)、初始固结条件等的影响,孔压增长并无统一模式,而且某一孔压模式也并不是某种土所特有的。通过本次试验,可以得出在剪切过程中孔隙水压力的发展模式并不能用 Seed 提出的式(2)来一概拟合。

在试验条件相同时,孔隙水压力的增长还与土体的渗透系数有关,而渗透系数又与土体颗粒组成有关。1 号粉土黏粒含量高,渗透系数小,在振动初始阶段,孔隙水压力不易消散和转移,致使初始孔隙水压力增长较快,随着循环荷载的施加至破坏,孔隙水压力发展至破坏孔压,并维持在该孔压水平附近。

4 结论

本文使用 DDS-70 型动三轴仪,对天津地区不同黏粒含量的粉土动强度做固结不排水动三轴试验,研究不同颗粒组成对土体动强度和动孔压的影响,结果表明:

- (1) 粉土的动强度受颗粒组成的影响,细颗粒含量越大,其动强度越小,黏粒含量为 7.2% 的粉土循环剪应力比 CSR 约为 20.3% 黏粒含量的粉土的 2 倍。
- (2) 粉土的动强度可以用循环剪应力比 CSR 和破坏振次 N_f 建立的幂函数关系式 $CSR = AN_f^{-B}$ 较好地拟合。
- (3) 粉土在固结不排水动三轴试验剪切过程中,孔隙水压力一直没有达到所施加的围压数值,最终稳定在 75%~85% 围压之间。

(4) 在本文的试验条件下,孔隙水压力的增长模式不能用统一的 Seed 模型拟合,孔压的增长规律影响因素较多,如土性、动荷载条件、初始固结条件等。

参考文献(References)

[1] 汪闻韶.饱和砂土振动孔隙水压力试验研究[J].水利学报,1962(2):36-47.
WANG Wen-shao. Experimental Study on Seismic Pore Pressure of Saturated Sands[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1962(2):36-47. (in Chinese)

[2] 汪闻韶.土液化特性中的几点发现[J].岩土工程学报,1980,2(3):55[J].63.
WANG Wen-shao. Some Findings in Soil Liquefaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1980, 2(3):55-63. (in Chinese)

[3] Seed H B, K L Lee. Liquefaction of Saturated Sands During Cyclic Loading[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 1966, 92(SM6):105-134.

[4] 周健,陈小亮,杨永香,等.饱和层状砂土液化特性的动三轴试验研究[J].岩土力学,2011,32(4):967-972.
ZHOU Jian, CHEN Xiao-liang, YANG Yong-xiang, et al. Study of Liquefaction Characteristics of Saturated Stratified Sands by

Dynamic Triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4):967-972. (in Chinese)

[5] 周健.波浪荷载作用下饱和粉土动力特性的试验研究[D].南京:河海大学,2012.
ZHOU Jian. Experiment Study on Dynamic Characteristics of Saturated Silts Under Wave Loading[D]. Nanjing: Hohai University, 2012. (in Chinese)

[6] 李飒,孙兴松,要明伦.混黏土的粉土粉砂室内试验液化判别标准的研究[J].岩土力学,2006,27(3):360-364.
LI Sa, SUN Xing-song, YAO Ming-lun. Study of Liquefaction Evaluation Used in Indoor Test of Silt, Silty Sand Mixed Clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3):360-364. (in Chinese)

[7] 闫澍旺,封晓伟.天津港软黏土强度循环弱化试验研究及应用[J].天津大学学报,2010,43(11):943-948.
YAN Shu-wang, FENG Xiao-wei. Test on Strength Cyclic Softening of Tianjin Harbor Soft Clay and Its Application[J]. Journal of Tianjin University, 2010, 43(11):943-948. (in Chinese)

[8] 曾长女,冯伟娜.粉土液化后剪切强度特性研究[J].地震工程学报,2014,36(1):7-15.
ZENG Chang-nv, FENG Wei-na. Characteristics of the Shear Strength of Post-liquefied Silt[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(1):7-15. (in Chinese)



孟加拉特大风暴潮与滇缅地区大地震的关联现象

郭安宁, 张向红, 吴建华, 赵乘程
(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

Correlation between the Great Storm Surges in Bangladesh and Large Earthquakes in the Yunnan—Burma Area

GUO An-ning, ZHANG Xiang-hong, WU Jian-hua, ZHAO Cheng-cheng
(Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou, Gansu 730000, China)

孟加拉国在 20 世纪曾发生过两次特大风暴潮。在这两次浩劫之前,在滇缅地区皆有 7 级以上地震发生,而且这两次大震和风暴潮在孟加拉国致灾区都位于北回归线所路过的东西长约 1 500 km 的地带中。这是沿北回归线东段和西段大震与风暴潮灾害相关联的一个巨灾链,下面作些介绍^[1]。

(1) 1970 年 1 月 5 日中国云南通海发生 7.7 级地震,死亡 15 621 人。该年 11 月孟加拉国遭受特大风暴潮,死亡约 30 万(另有资料介绍为 22.5 万人)。

(2) 1991 年 1 月 5 日在缅甸曼德勒北发生 7.6 级大震,因属山区,死人情况不明。该年 4 月在孟加拉国登陆的热带气旋曾夺去 13.9 万人的生命^[2]。

为什么孟加拉湾这两次风暴潮比该地其他的风暴潮强得多呢? 而且它们恰与滇缅地区的大地震在时间上相近呢? 我们曾用北回归线效应来解释^[2]。另外,滇缅大地震也与长江巨洪有着关联^[3]。值得指出的是,2008 年 5 月 12 日汶川特大地震前,缅甸发生了特大风暴潮,称为特强气旋风暴纳尔吉斯(Very Severe Tropical Storm Nargis),纳尔吉斯横扫了缅甸南部的海岸线,引起严重风暴潮,造成极大破坏,它在该国至少导致 90 000 人死亡,56 000 人失踪。它是缅甸历史上最严重的自然灾害,CNN 引用美国官方估计最后的死亡人数将超过十万人。